

# 开关电源谐波分析及抑制方法\*

徐 顺 刚

(重庆师范大学 物理学与信息技术学院, 重庆 400047)

**摘要** 由单相大功率整流器、单相逆变电路高频大功率开关电源的理论分析可知,开关电源在运行时一定会产生大量的谐波成分。为了解决开关电源产生的谐波给电网稳定带来的危害,设计了一种通用的三相无源滤波器装置并安装在系统的谐振点。通过仿真和试验可知,该装置能够滤除开关电源产生的大部分谐波,抑制谐波向电网注入,使各次谐波的含量低于我国制定的标准,该装置不仅能抑制谐波还能够为系统提供无功功率,从而提高系统功率的因素,保证了电网的电能质量和开关电源的稳定性。

**关键词** 谐波 开关电源 交流纹波

**中图分类号** TM714

**文献标识码** A

**文章编号** 1672-6693(2009)03-0079-03

近年来,随着电力电子技术的快速发展,开关电源的应用越来越广泛<sup>[1]</sup>。一方面开关电源正朝着高可靠性和小型化的方向发展;另一方面,电力电子装置本身的功率容量和功率密度也在不断提高,比如智能电焊机、光伏发电、变频器、伺服控制系统等等,而开关电源中的大功率开关管在高频的开、关运行时必然会产生高次谐波和电磁干扰,注入到电网中,危及电网和系统本身的稳定。现在国内外抑制谐波的方法主要有无源滤波和有源滤波两种方式,国内外对谐波的分析抑制都有相当多的文献报道,特别是对有源滤波器的研究。虽然有源滤波器在理论上滤波效果较好,但由于其技术复杂、成本较高,目前实际应用比较少。在大多数情况下,抑制谐波仍然采用无源滤波的方式,无源滤波一方面可以抑制谐波,另一方面有无功补偿的作用。

目前谐波已经成为开关电源与电子系统能否在应用现场正常可靠运行的主要障碍之一<sup>[2-5]</sup>。欧美国家在 1996 年已制定了相关标准并强制严格执行,不符合其标准的电气产品不准进入市场。我国也在 2003 年制定了相应的标准,并在少数城市实行了对用户谐波含量超标进行一定处罚的制度,因此对开关电源谐波的研究目前显得尤为重要。

## 1 谐波产生的理论分析

电力电子器件的开关特性具有很强的非线性,开关电源在运行时会产生大量的谐波干扰。

### 1.1 单相大功率整流器的谐波分析

人们偏爱正弦波是因为其不含谐波,从而减少铁损并提高效率<sup>[5]</sup>。在电机、变压器、电器设备设计时都假定了供电电源是正弦波,然而实际上在供电系统中不可能有标准的正弦波和直流电源,它们都是由不同频率的正弦波叠加而成,如图 1 为单相整流电路图。

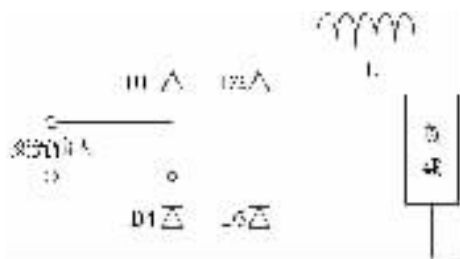


图 1 单相大功率整流电路

要使交流电压整流后负载直流电流的纹波很小,就要加入一个大的电感即  $L/R \gg T$ ,  $T$  的工频时为 20 ms,这样负载直流近似为直流  $I_d$ 。由于在负载端电感电流不能突变同时开关管在实际应用中开和关的时候有上升和下降时间,因此负载电流如图 2 所示。

上升、下降的时间角度为

$$\phi = \frac{2\pi t_r}{T}$$

对负载电流进行傅立叶分解

$$i = I_d (c_1 \sin \omega t + c_3 \sin 3\omega t + c_5 \sin 5\omega t + \dots) \quad (1)$$

从(1)式可看出单相整流的电流含有高次谐波。

\* 收稿日期 2008-07-29 修回日期 2009-02-27

资助项目 国家自然科学基金(No. 50677056)

作者简介 徐顺刚,男,讲师,博士研究生,研究方向为大功率开关变化器、电力电子与电力传动。

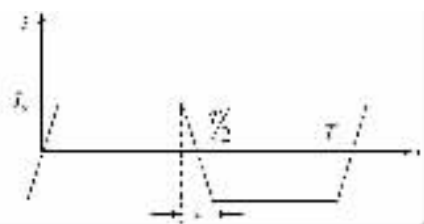


图2 单相整流负载电流

### 1.2 单相逆变电路的谐波分析

图3为典型的单相逆变电路,假设直流电压为 $E$ ,开关管在理想的情况下工作,即零电压开通和零电流关断,开和关的时间为零,开关管的占空比为50%。

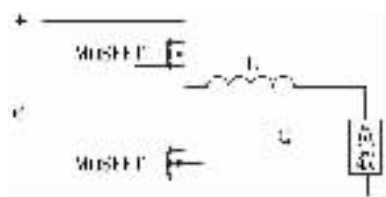


图3 单相逆变电路

在图3中可得如下表达式

$$V(t) = E (0 \leq t \leq \frac{T}{2}) \quad (2)$$

$$V(t) = 0 (\frac{T}{2} \leq t \leq T) \quad (3)$$

(2)、(3)式进行傅立叶变换

$$V(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} \left[ a_m \cos \frac{2\pi mt}{T} + b_m \sin \frac{2\pi mt}{T} \right]$$

$$(m = 2n - 1, n = 1, 2, \dots)$$

其中

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} V(t) dt = \frac{E}{2}, a_m = 0$$

$$b_m = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} V(t) \sin mtdt = \frac{2E}{m\pi}$$

则

$$V(t) = \frac{E}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} \left[ \frac{2E}{(2n-1)\pi} \sin \frac{2(2n-1)\pi t}{T} \right] =$$

$$\frac{E}{2} + \frac{2E}{\pi} \sin \omega t + \frac{2E}{3\pi} \sin 3\omega t + \dots \quad (4)$$

其中频率与周期信号一致的分量称为1次谐波,又称基波,频率为周期信号3倍者称为3次谐波,3次及以上的谐波称为高次谐波。

方波电压 $V(t)$ 是高次谐波叠加而成,谐波电压在电感、电阻等负载上形成谐波电流,因此负载电流也是由各次谐波电流叠加而成。

从以上单相的整流和单相的逆变电路分析,在电流回路中一定有谐波电流,同理可推出三相的整流和逆变也一定有谐波电流存在,因此只要有开关电源电气设备一定会有谐波的产生。

## 2 谐波的抑制方法

开关电源谐波的抑制可分为预防性和补救性两

类。预防性是在设计开关电源时根据设计要求用有效的过程和方法来控制开关管,但是无论用何种先进的控制策略,谐波成分是无法避免的。补救性的解决方法是为了克服系统已经存在谐波成分所采用的技术,目前所用办法是用滤波器(无源滤波器、有源滤波器),有源滤波器在国内外有相当多的文献从理想的角度去研究,但是在实际应用中是非常困难的,比如系统谐波含量的检测、抵消谐波含量的多少、实时性并且有源滤波器又有开关器件其自身又产生谐波等等,因此从制作成本和控制方法看无源滤波器是非常适用,在设计时考虑一定的裕量,可以设计为较通用的滤波装置<sup>[6-8]</sup>。

由于在开关电源和控制系统中从谐波能量分析来看,3、5、7次谐波含量最大,其它高次谐波能量小远远低于国家制定的标准。无源滤波器的设计方法比较多,作者通过仿真分析设计出一个抑制3、5、7次的无源滤波器,如图4、5所示。从仿真图可以看出该设计方法能抑制3次( $L_1$ 、 $R_1$ 、 $C_1$ )、5次( $L_2$ 、 $R_2$ 、 $C_2$ )、7次( $L_3$ 、 $R_3$ 、 $C_3$ )谐波<sup>[3]</sup>。

## 3 试验和数据

图4设计了一个无源滤波器,无源滤波器并联在电路中,并且要选好连接的谐振点,否则达不到预期抑制效果,如图6。经过仿真与反复试验选取参数如下: $L_1 = 348 \text{ mH}$ 、 $C_1 = 3.2 \text{ }\mu\text{F}$ 、 $R_1 = 6 \text{ }\Omega$ 、 $L_2 = 180 \text{ mH}$ 、 $C_2 = 2.3 \text{ }\mu\text{F}$ 、 $R_2 = 6 \text{ }\Omega$ 、 $L_3 = 75.6 \text{ mH}$ 、 $C_3 = 2.7 \text{ }\mu\text{F}$ 、 $R_3 = 10 \text{ }\Omega$ 。

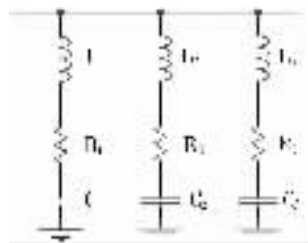


图4 无源滤波器电路图

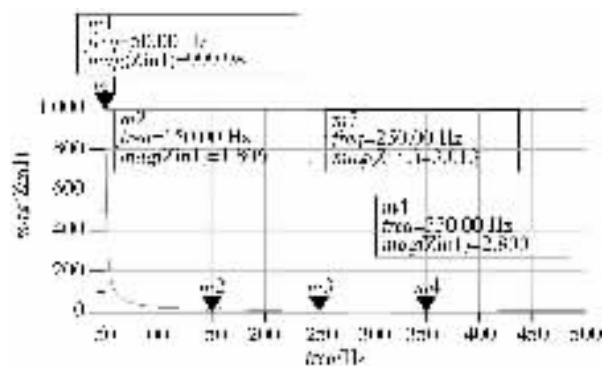


图5 无源滤波器仿真图

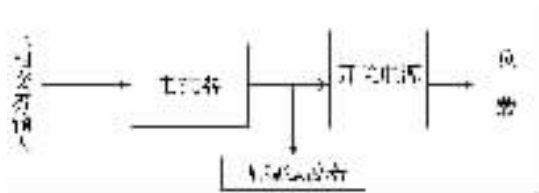


图6 无源滤波器安装接线图

该滤波装置对 TZ-3X100 型三相级整流凸焊机测试,图7为没有安装滤波器时开关电源输入端的电压波形图,其谐波含量达到17%。图8为安装滤波器装置后在开关电源输入端测试的电压波形图,其谐波含量仅为2%,显然滤波器达到了非常好的效果。

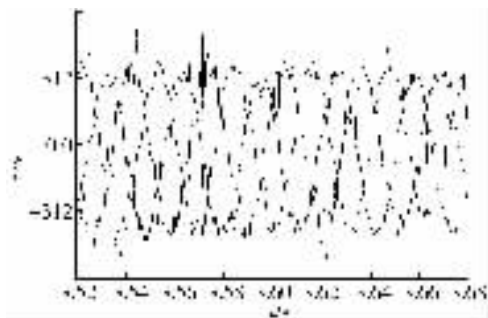


图7 没有接入滤波器的电压波形图

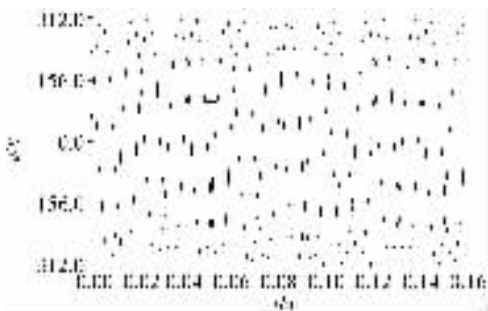


图8 接入滤波器电压波形图

## 4 结语

通过以上对单相开关电源整流和逆变的理论分析可知,大功率高频开关电源一定存在谐波含量,通过测试可看出谐波含量较大,因此抑制谐波已是当务之急。作者设计了一套三相无源滤波器装置,通过对焊机的测试可看出接入滤波器装置后三相电源电压的谐波成分减少,低于国家标准,达到了满意的效果。同时接入该滤波器后能提高功率因素,该滤波器对光伏发电系统、伺服控制系统等也同样适用。

## 参考文献:

- [1] 范嗣强,戴特力,梁一平. 千瓦级连续激光二极管面阵电源的设计与实现[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),2005,22(3): 83-87.
- [2] WAKILEHGJ. 电力系统谐波-基本原理、分析方法和滤波器设计[M]. 徐政译. 北京: 机械工业出版社,2003.
- [3] 钱照明. 电磁兼容设计基础及干扰抑制技术[M]. 浙江: 浙江大学出版社,2000.
- [4] 周佩白,鲁君伟. 电磁兼容问题的计算机模拟与仿真技术[M]. 北京: 中国电力出版社,2006.
- [5] 凡木文. 新型无污染大功率开关电源[D]. 成都: 四川大学,2003.
- [6] 李旷,肖国春,王兆安. 耦合变压器型串联直流有源电力滤波器的研究[J]. 西安交通大学学报,2004,38(6): 632-635.
- [7] 范瑞祥,罗安,李欣然. 并联混合型有源电力滤波器的系统参数设计及应用研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(2): 106-111.
- [8] 罗安. 电网谐波治理和无功补偿技术及装备[M]. 北京: 中国电力出版社,2006.

## Study of the Harmonics of Switching Power Supply

XU Shun-gang

(College of Physics and Information Technology, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China)

**Abstract:** In order to improve the electric energy quality of switching power supply through the theoretical analysis on the high frequency large-power rectification and the reverse switch supply theory, we have concluded that the switch supply is the main polluting source of affecting the power energy quality. At the same time, we have obtained that the contents of 3, 5, 7th-fold harmonic components in the switching supply are the highest through the measurement of special harmonics test instrument. Other high-frequency harmonics also exist, but their proportions are rather low, as can be neglected. Therefore, the 3, 5, 7th-fold harmonic components of the switching supply are the major reasons leading to the system polluted. In order to eliminate the pollution of the harmonics produced by the switching supply to power grid and the side-effect to its own control system, this paper designs a general 3-phase passive filter instrument which can not only restrict harmonics, but also improve the power factor of the supply system. The test shows that the method can make the supply system to ideal effect, the contents of all kinds of harmonics become rather lower than the standard constituted by our country, and it also degrades the power harmonics and decreases the alternating current ripples greatly.

**Key words:** harmonics; switching power supply; alternating current ripples

(责任编辑 欧红叶)